

Túneis de Comportamento Sísmico Melhorado. O conceito “TISB”



**S. Pompeu
Santos¹**

RESUMO

O artigo apresenta uma solução inovadora e muito económica para a construção de túneis rodoviários ou ferroviários, executados com máquina tuneladora (“TBM”) quando os referidos túneis são executados em solos brandos (aluviões, etc), em zonas sísmicas. Este conceito pode também ser aplicado no reforço de túneis já existentes, usando o túnel existente como cofragem para a execução do reforço interior. No artigo é apresentada a descrição e a justificação da solução, bem como a sua aplicação ao estudo de um caso concreto.

PALAVRAS-CHAVE

Túneis, TBM, Comportamento sísmico, Solos brandos, Reforço

¹ Engenheiro Civil, Investigador do LNEC, 1700-066 Lisboa, Portugal. pompeu.santos@lnec.pt

1. INTRODUÇÃO

A execução de túneis com máquina tuneladora, “TBM” (“tunnel boring machine”), é uma solução cada vez mais usada na realização de infraestruturas de transportes, nomeadamente, de redes de transportes rodoviários e ferroviários, quer inter-regionais, quer urbanos.

Na execução de um túnel com uma tuneladora, a máquina vai escavando o terreno e colocando aduelas prefabricadas de betão, que são “gateadas” umas às outras, de modo a formar a parede circular do túnel.

A solução convencional de execução de túneis com tuneladora é apropriada para terrenos rijos (rocha, argila compacta, areia compacta, etc.), já que os túneis assim obtidos têm a sua estabilidade assegurada pela resistência do terreno circundante (a função das aduelas é praticamente apenas de acabamento interior do túnel), pelo que não necessitam de resistência significativa, tanto na direcção longitudinal como transversal.

No caso de solos brandos, como as aluviões (lodo, argila mole, etc.), a execução de túneis com tuneladora é pouco fiável, já que, como as ligações entre aduelas são relativamente fracas (é uma espécie de “Lego”), a resistência do túnel é baixa, havendo o risco de assentamentos, ou mesmo de colapso, particularmente se ocorrer um sismo. Os tratamentos dos terrenos, por vezes usados para melhorar o comportamento sob a acção de sismos, além de serem bastante caros, por vezes não garantem a desejada fiabilidade.

2. EXECUÇÃO DE TÚNEIS COM TUNELADORAS

As tuneladoras são máquinas muito complexas, atingindo comprimentos da ordem de 100 a 200 metros (Fig. 1, Fig.2 e Fig.3) [1, 2]. As tuneladoras do tipo “EPB” (“Earth Pressure Balance”) são as mais usadas.

A componente mais importante da tuneladora é o escudo frontal, em forma de cilindro, que engloba várias componentes, nomeadamente, a cabeça de corte rotativa, a câmara de recepção, os motores de accionamento, o “sem-fim”, os macacos de “empuxe” e o erector de montagem das aduelas prefabricadas.

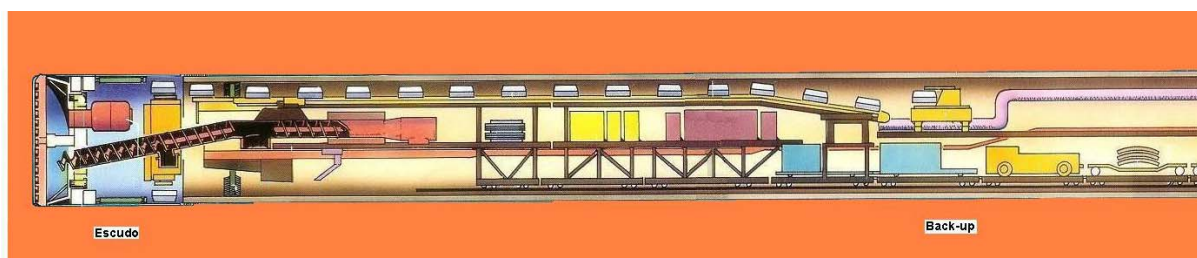


Figura 1. Corte longitudinal de uma tuneladora

Na frente do escudo funciona a cabeça de corte rotativa, dotada de discos cortadores, que cortam o terreno em bocados e fica armazenado na câmara de recepção estanque. O material cortado é depois extraído da câmara de recepção através do “sem-fim” e colocado num tapete rolante. O escudo é empurrado para a frente através de macacos de “empuxe”, que se apoiam no último anel de túnel montado. A parte traseira do escudo é vedada através de injecções, de modo a impedir a entrada da água ou da terra no espaço entre o escudo e as aduelas que vão sendo montadas.

A tuneladora compreende ainda um comboio de apoio traseiro (“back-up”), de grande extensão, no qual são instalados outros equipamentos necessários à operação. Dentro do túnel são normalmente usados comboios apropriados para o transporte das aduelas e para a retirada da terra.

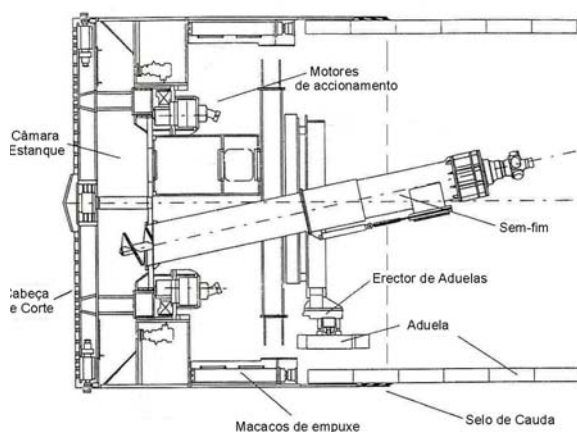


Figura 2. Corte esquemático do escudo duma



Figura 3. Escudo de tuneladora de grande porte

As aduelas prefabricadas são de betão de alta resistência (C40, ou superior) e têm à volta de 1,5m de largura, nas situações correntes. O número de aduelas será o adequado para formar um círculo completo com peças com um determinado peso, sendo correntemente usadas 6 aduelas por anel. A espessura das aduelas depende de vários parâmetros, representando à volta de 1/25 do diâmetro interior do túnel. As aduelas são ligadas umas às outras através de parafusos curvos e “chaves” longitudinais.

Em Portugal há já experiência do uso de tuneladoras, nomeadamente, na execução, recente, de troços de túneis do Metro de Lisboa e do Metro do Porto. Trata-se de tuneladoras de médio porte, com escudos com diâmetros da ordem de 9-10 metros. Estão nesta altura em operação em Madrid duas tuneladoras com escudos com 15,2m de diâmetro, as maiores do mundo, sendo de prever o aparecimento de outras, ainda de maior porte, num futuro próximo.

3. O CONCEITO “TISB”

3.1 Descrição da solução

O conceito “TISB” (“Tunnel of Improved Seismic Behaviour”), ou seja, “Túnel de Comportamento Sísmico Melhorado” [5, 6], é ilustrado na Figura 4, em que se mostra uma perspectiva geral e uma perspectiva detalhada do túnel.

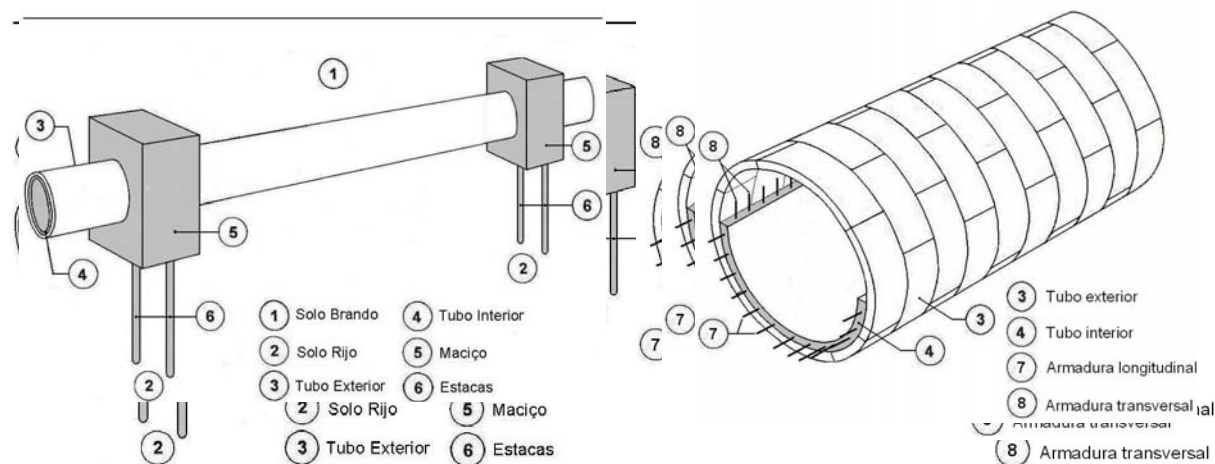


Figura 4. Ilustração da solução

O túnel é composto por dois tubos, funcionando em conjunto; um tubo exterior, que é um túnel convencional, executado pela tuneladora, no solo brando, e um tubo interior, que é executado posteriormente, dentro do tubo exterior. No caso de haver uma variação significativa das cargas verticais actuates (devido ao aumento ou à diminuição do peso do terreno sobre o túnel, por exemplo), o túnel será provido de maciços de apoio, regularmente espaçados ao longo do eixo do túnel.

O tubo exterior será, assim, formado por aduelas prefabricadas, montadas pela tuneladora. O tubo interior será executado dentro do tubo exterior, usando este último como cofragem exterior e uma cofragem móvel no interior. O tubo interior será provido das armaduras tanto longitudinais como transversais necessárias ao túnel para resistir às acções actuates.

Os maciços de apoio serão, em princípio, obtidos através da execução de colunas de “jet-grouting” no terreno brando. Estes maciços serão prolongados verticalmente através de elementos resistentes com grande flexibilidade horizontal (estacas esbeltas) e elevada ductilidade, de modo a transmitir as cargas verticais ao terreno rijo e ao mesmo tempo permitir movimentos horizontais do túnel durante a actuação de um sismo.

As estacas serão, em princípio, estacas de betão armado, executadas através da furação dos maciços e do terreno brando, sendo ancoradas no terreno rijo. Serão executadas depois da passagem da tuneladora.

A armadura longitudinal do tubo interior será a necessária para assegurar a resistência do túnel às acções verticais (aumento ou diminuição do peso do terreno suprajacente, pressão hidrostática, etc.), limitando também os assentamentos do túnel. A quantidade de armadura a colocar deverá ser balanceada com a distância entre maciços. Esta armadura será adequadamente confinada de modo que as extensões no betão sejam aceitáveis sob a acção dos movimentos horizontais do túnel durante a actuação de um sismo.

A armadura transversal do tubo interior será a necessária para resistir às acções no plano das secções do túnel, nomeadamente, o peso do terreno suprajacente e a pressão da água envolvente, tendo em conta a reacção lateral do terreno. Esta armadura será também adequadamente confinada, de modo que as extensões no betão sejam também aceitáveis sob acção do diferencial de deslocamentos entre o topo e a base do túnel durante a actuação de um sismo.

No caso de escavações em terrenos imersos, deverá ser garantido que o tubo exterior não flutue devido a uma eventual rotura do solo. Nestas situações deverá, assim, ser garantido que o peso do terreno suprajacente seja superior ao peso do terreno a ser escavado, adoptando um coeficiente de segurança adequado. Com recobrimentos de terreno inferiores, deverá ser executado um aterro antes da passagem da tuneladora.

3.2 Vantagens da solução

A solução permite a obtenção de estruturas monolíticas (sem juntas), com grande resistência (tanto na direcção longitudinal como na direcção transversal) e elevada ductilidade. Além disso, as estruturas obtidas apresentam grande redundância estrutural, o que pode ser muito importante no caso da ocorrência de cenários não previsíveis durante a fase de projecto.

No que se refere às acções actuates de carácter estático, a estrutura formada pelo dois tubos, pelos maciços de apoio e pelas estacas, garantem ao túnel a resistência necessária.

No que se refere à acção dos sismos, a solução permite a exploração de elevada ductilidade no túnel, já que esta irá depender da ductilidade do tubo interior e da das estacas, as quais poderão ser garantidas através do adequado confinamento das suas armaduras, funcionando os maciços como uma espécie de apoios móveis horizontais. A solução será também muito eficaz no caso da ocorrência dos fenómenos de liquefacção ou de mobilidade cíclica, já que a estrutura poderá facilmente resistir a perdas localizadas de apoio no terreno, funcionando como uma viga.

A solução tem ainda outras vantagens. É completamente estanque, já que não possui juntas, e apresenta elevada resistência ao fogo e elevada durabilidade. Esta poderá ainda ser facilmente melhorada, protegendo as armaduras através de protecção catódica, ligando-as a uma corrente eléctrica contínua de baixa intensidade.

Com esta solução o túnel pode ser construído muito próximo da superfície do terreno, o que permite reduzir significativamente a extensão dos troços de aproximação do túnel.

4. APLICAÇÃO AO ESTUDO DE REABILITAÇÃO DE UM TÚNEL EXISTENTE

4.1 Situação existente



Figura 5. Aterro executado para a passagem da tuneladora na zona em frente à Praça do Comércio, em Lisboa

com água, de modo a equilibrar as pressões dentro e fora do túnel, parando assim o movimento de solo para o interior do túnel.

Com esta medida o processo de colapso foi estancado mas, com o peso adicional o túnel deformou verticalmente ao longo de uma extensão de cerca de 200 metros, em frente da referida praça, local onde o solo apresenta piores características geotécnicas: aterros e aluviões com mais de 40 metros de espessura (Fig. 6).

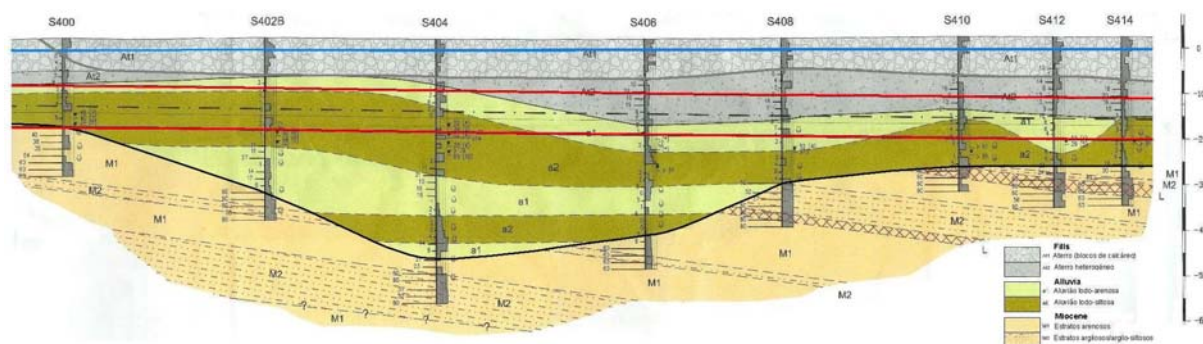


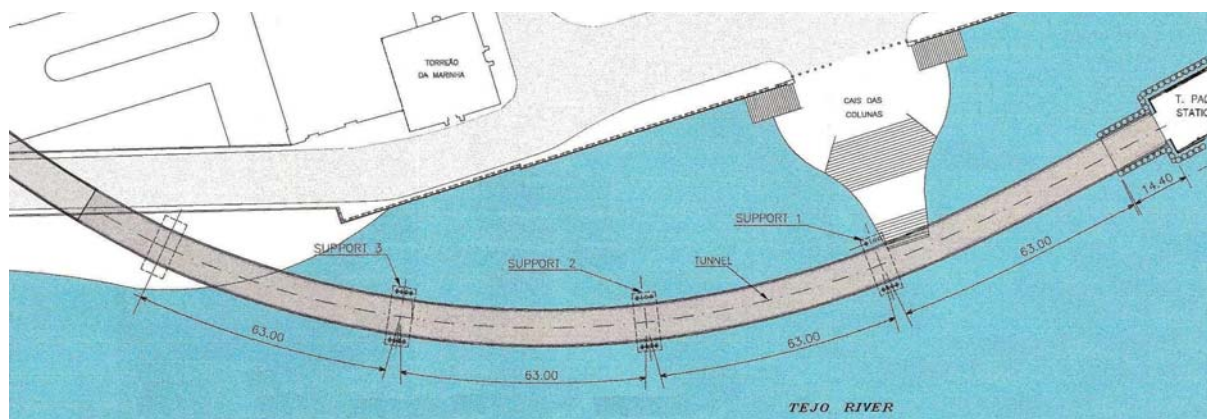
Figura 6. Características do terreno na zona acidentada do túnel

Esta deformação provocou a abertura de fendas longitudinais ao longo do túnel, e, como resultado, um significativo número de aduelas prefabricadas ficou muito danificada, o que obrigou ao lançamento de uma empreitada para o seu reforço estrutural.

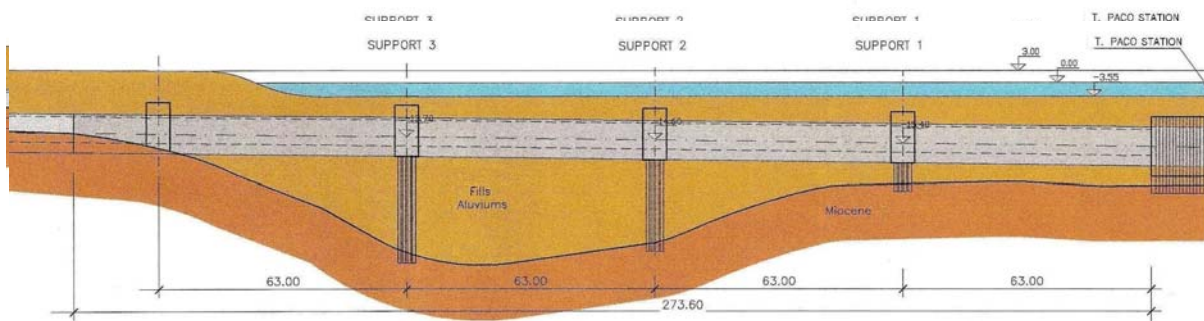
4.2 Solução alternativa proposta

Na fase de preparação da obra, o empreiteiro a quem a obra fora adjudicada (Zagope, SA) questionou a segurança em relação à acção dos sismos conferida pela solução de reforço posta a concurso, tendo apresentado uma solução alternativa que contemplava o respectivo reforço sísmico, a qual foi desenvolvida com base no conceito “TISB”, atrás referido (Fig. 7 e Fig. 8) [3]. Os principais trabalhos propostos foram:

- Execução de um tubo interior, contínuo, em betão armado, dentro do túnel existente, na zona sinistrada.
- Execução de 3 suportes intermédios, criando 4 vãos de 63 metros cada, funcionando as ligações das extremidades do túnel à estação Terreiro do Paço, de um lado, e ao solo rijo, do outro lado, como apoios de encastramento.



a) Planta



b) Alçado lateral

Figura 7. Planta e alçado lateral

A secção transversal do tubo interior é constituída por uma abóbada circular com 0.35m de espessura e uma laje com espessura variável de 0,40m a 0,60m. A laje é construída, demolindo a camada superior do enchimento de betão poroso existente.

Os suportes intermédios são constituídos por maciços formados por colunas de “jet-grouting”, envolvendo o túnel, por cima e lateralmente. O efeito do “jet-grouting” inferior é substituído pela amarração do tubo interior ao “jet-grouting” lateral, através de grupos de ancoragens radiais. As dimensões dos maciços são: 15m x 6m em planta e 13m de altura. Cada maciço é prolongado até ao Miocénico através de 2 grupos de 4 estacas de 0,80m de diâmetro (4 estacas de cada lado).

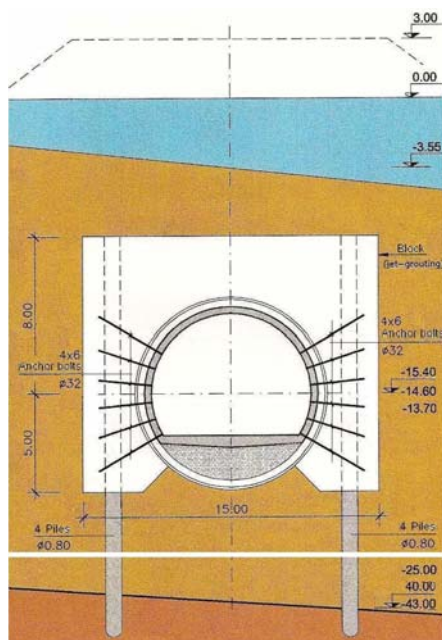
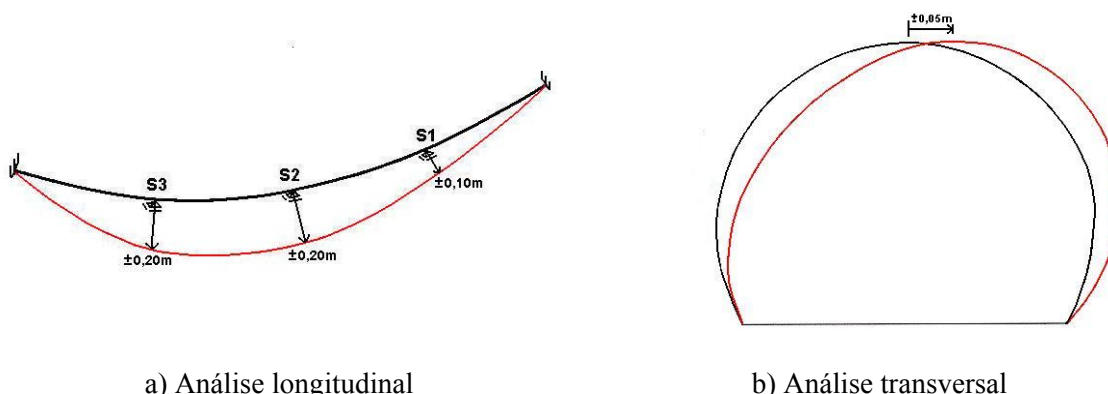


Figura 8. Secção transversal

pelo que os efeitos de um sismo podem ser tratados como deslocamentos horizontais impostos pelo solo à estrutura.

Como, de acordo com os resultados obtidos, os fenómenos de liquefacção e mobilidade cíclica podem ocorrer, foi considerado um valor de 0.20m para o deslocamento horizontal máximo a meia altura do túnel, na zona mais espessa de aluviões (entre os maciços 2 e 3; $h \approx 30m$; distorção = 1/150), com uma variação linear até às extremidades do túnel.

A estrutura foi analisada através de modelos lineares simplificados (Fig. 9). Na análise longitudinal considerou-se um modelo plano, com o tubo encastrado nos topos e submetido ao diagrama de deslocamentos horizontais atrás referido. O efeito nas secções transversais do diferencial de deslocamentos entre o topo e a base do túnel foi analisado considerando um valor de 0.05m (distorção = 1/150, tal como na análise longitudinal).



a) Análise longitudinal

b) Análise transversal

Figura 9. Deslocamentos impostos na análise sísmica

As estacas dos maciços foram analisadas como elementos lineares com rotações restringidas no topo e na base, submetidas ao diferencial de deslocamentos relativos horizontais aplicado ao tubo.

Estas análises permitiram obter os valores das extensões máximas no betão em cada um destes elementos estruturais, e, em consequência, as armaduras de confinamento necessárias, compatíveis com os valores das referidas extensões. A Figura 10 mostra o “lay-out” geral das armaduras [3].



A solução alternativa não foi, contudo, aceite pelo dono da obra, tendo sido posteriormente realizada uma empreitada complementar para reforço do terreno envolvente do túnel.

5. CONCLUSÕES

A solução alternativa proposta para o reforço do túnel do Metro na zona do Terreiro do Paço mostrou que o conceito “TISB” é perfeitamente adequado para a execução (ou o reforço) de túneis executados com a técnica “TBM” em solos brandos, em zonas sísmicas, dispensando a necessidade de tratamentos suplementares do solo.

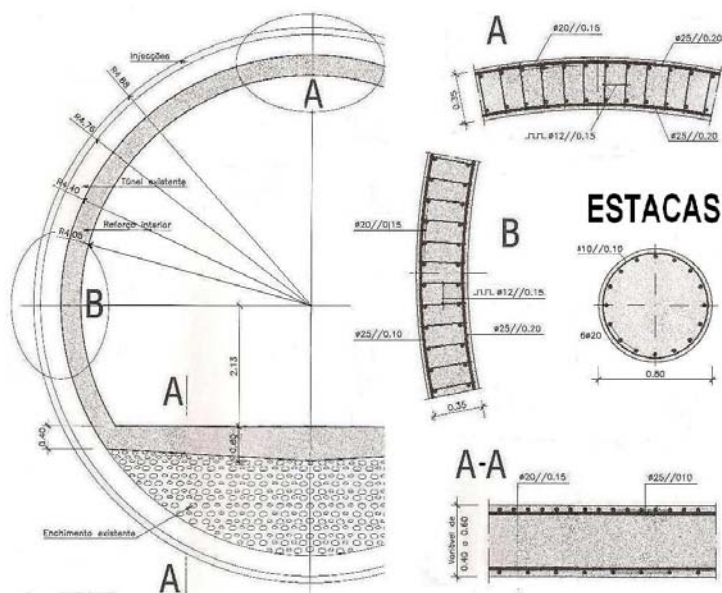


Figura 10. “Lay-out” geral das armaduras

Trata-se, portanto, de um grande desenvolvimento que pode permitir dar respostas adequadas, em termos de fiabilidade e de custo, aos desafios levantados pela realização deste tipo de obras, nas circunstâncias atrás referidas.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se ao “staff” da Zagope SA pela colaboração no desenvolvimento da solução, bem como aos Professores C. Sousa Oliveira, M. Lopes e R. C. Gomes pela elaboração dos estudos de comportamento sísmico.

REFERÊNCIAS

- [1] STOREBELT, A/S- Storebeltsforbindelsen. June, 1994.
- [2] ODEBRECHT- Metropolitano de Lisboa. Desafios de Engenharia em Portugal. Odebrecht / Bento Pedroso, Outubro de 2003.
- [3] ZAGOPE- Reforço do Túnel do Metro do Terreiro do Paço. Avaliação da Solução Posta a Concurso e Apresentação de Uma Solução Melhorada. Zagope SA, Relatório Interno, Dezembro de 2005.
- [4] SOUSA-OLIVEIRA, C. [et al.]- Reforço do Túnel do Metro do Terreiro do Paço. Estudos de Suporte para a Comparação do Comportamento Sísmico da Solução Posta a Concurso com o de uma Solução Alternativa. Relatório ICIST, EP n.3/06, Janeiro de 2006.
- [5] POMPEU-SANTOS, S.- Tunnel Supported on Bearing Blocks. Application to PCT, January 2007.
- [6] POMPEU-SANTOS, S.- Tunnels of Improved Seismic Behaviour. Proceedings of the FIB Symposium “Taylor Made Concrete Structures. New Solutions for our Society”, Amsterdam, May, 2008.